

**Paper Type: Original Article**

Designing a Mathematical Model of Spare Parts Supply Chain in a Defense Organization under Uncertainty

Hassan Fattahi^{1,*}, Mohammad Ali Javadzade² ¹PhD Student in Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Imam Hussein University; hasanfatahi77@ihu.ac.ir.²Assistant Professor at Imam Hussein Comprehensive University; javadzade@ihu.ac.ir.**Citation:**Fattahi, H., & Javadzade, M. A. (2024). Designing a mathematical model of spare parts supply chain in a defense organization under uncertainty. *Management: Modeling, analysis and applications*, 1(4), 227–243.

Received: 13/02/2024

Reviewed: 27/06/2024

Revised: 09/07/2024

Accepted: 18/08/2024

Abstract

Purpose: Timely provision of spare parts is one of the essential requirements for the operational readiness of defense systems and a strategy for enhancing service levels in operational units. This study presents and solves a model for the spare parts supply chain in a defense organization under conditions of uncertainty.

Methodology: Given that the proposed mathematical model for the spare parts supply chain in the defense organization is of the NP-hard type, metaheuristic methods are employed to solve it. These methods produce near-optimal solutions within a reasonable time compared to exact methods. In this study, the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II), a multi-objective genetic algorithm, has been used to solve the model.

Findings: To demonstrate the effectiveness of the NSGA-II algorithm, its results were compared with those obtained from solving the mathematical model using the exact Ames method. The findings indicate that the average percentage difference between the proposed algorithm and the exact method is less than 1%. Moreover, the time required to reach a solution using the proposed algorithm is significantly lower than that of the exact method. Therefore, the proposed algorithm converges to an optimal and efficient solution.

Originality/Value: Due to the numerous constraints in the mathematical model of the spare parts supply chain problem for a defense organization, and the pursuit of multiple objectives such as cost minimization and increased responsiveness, the real-world dimensions of this problem are large. Achieving an optimal solution through exact methods within a reasonable time frame is not feasible. This highlights the necessity of employing metaheuristic approaches for such problems. The results indicate that the average execution time for P31–P39 using AIMMS software is approximately 2510, whereas the metaheuristic NSGA-II algorithm achieves an average time of around 479, demonstrating the superior efficiency of the metaheuristic algorithm compared to the exact solution method.

Keywords: Supply chain, Spare parts, Uncertainty, Metaheuristic algorithms, Multi-objective genetic algorithm.

Corresponding Author: hasanfatahi77@ihu.ac.ir

<https://doi.org/10.22105/mmaa.vi.76>

Licensee. **Management: Modeling, Analysis and Application**. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



طراحی مدل ریاضی زنجیره تامین قطعات یدکی در یک سازمان دفاعی در شرایط عدم قطعیت

حسن فتاحی^۱، محمدعلی جوادراده^۲

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی صنایع دانشکده فنی مهندسی دانشگاه جامع امام حسین (ع).

^۲ استادیار دانشگاه جامع امام حسین (ع).

چکیده

هدف: تامین به موقع قطعات یدکی یکی از الزامات آماده به کار بودن سیستم های دفاعی و راهکارهای افزایش سطح خدمت در یگان های عملیاتی است. این تحقیق، مدلی برای زنجیره تامین قطعات یدکی در یک سازمان دفاعی در شرایط عدم قطعیت ارائه و حل می کند.

روش شناسی پژوهش: با توجه به این که مدل ریاضی پیشنهادی برای زنجیره تامین قطعات یدکی در سازمان دفاعی، از نوع مسایل پیچیده (NP-hard) می باشد، از روش های فراابتکاری برای حل آن استفاده می شود که در زمان معقولی نسبت به روش های دقیق، جواب های نزدیک به بهینه تولید می کنند. در این پژوهش، از الگوریتم های فراابتکاری ژنتیک رتبه بندی نامغلوب^۱ برای حل این مدل استفاده شده است.

یافته ها: برای اثبات کارایی الگوریتم NSGA-II، نتایج آن با نتایج حل مدل ریاضی توسط روش دقیق ایمز مقایسه شده است که نتایج نشان می دهد متوسط درصد اختلاف جواب الگوریتم پیشنهادی با روش دقیق، کمتر از ۱% می باشد. در ضمن زمان رسیدن به جواب در الگوریتم پیشنهادی نسبت به روش دقیق، به مراتب پایین تر است. بنابراین الگوریتم پیشنهادی، همگرا به جواب بهینه و کارا می باشد.

اصالت/ارزش افزوده علمی: از آن جا که در مدل ریاضی مساله زنجیره تامین قطعات یدکی یک سازمان دفاعی، محدودیت های بسیاری وجود دارد و اهداف چندگانه از جمله کمینه سازی هزینه و افزایش سطح پاسخ گویی دنبال می شود، ابعاد این مساله دنیای واقعی بزرگ می باشد و رسیدن به جواب بهینه با روش های دقیق (در زمان معقول) امکان پذیر نیست. این موضوع، ضرورت به کارگیری روش های فراابتکاری در چنین مسایلی را نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که متوسط زمان اجرای P31-P39 توسط نرم افزار ایمز حدود ۲۵۱۰ و توسط الگوریتم فراابتکاری NSGA-II در حدود ۴۷۹ می باشد که نشان از کارایی بالای الگوریتم فراابتکاری نسبت به روش حل دقیق دارد.

کلیدواژه ها: زنجیره تامین، قطعات یدکی، عدم قطعیت، الگوریتم های فراابتکاری، الگوریتم ژنتیک چندهدفه.

۱- مقدمه و بیان مساله

هر سیستم تولیدی از قطعات و اجزای مختلفی تشکیل شده است که این سیستم تولیدی لازم است برای تولید محصول، بدون کاهش عملکرد، وظیفه خود را به خوبی انجام دهد. اما در گذر زمان ممکن است خرابی هایی در هر یک از قطعات سیستم رخ دهد که اجتناب ناپذیر هستند. این خرابی ها می توانند منجر به بروز وقفه در فرآیند تولید و عدم دستیابی به اهداف تولیدی شوند که در صورت وجود تقاضا برای محصول، منجر به از دست دادن تقاضا یا فرصت سودآوری می گردند. پس باید زمان ازکارافتادگی سیستم ها را به حداقل رسانید. برای به حداقل رساندن زمان ازکارافتادگی سیستم ها، قطعات یدکی باید همواره در دسترس باشند. از طرفی، خرید و نگهداری قطعات یدکی عموماً پرهزینه است و علاوه بر این، این قطعات

¹ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II)

ریسک منسوخ‌شدگی بالایی دارند. لذا مدیریت صحیح موجودی قطعات یدکی، نقش مهمی در مدیریت هزینه‌های سیستم دارد. از طرف دیگر تعداد تامین‌کنندگان قطعات یدکی خاص، پایین است. در واقع اگر تامین‌کننده اصلی، این قطعات را تامین نکند یا با اختلال مواجه شود، معمولاً باید به تامین‌کننده دیگری سفارش ساخت داده شود. این امر سبب می‌شود، قیمت و زمان تحویل به‌طور قابل‌توجهی افزایش یابد [1]. مشاهدات نشان می‌دهد که درصد زیادی از زمان تلف‌شده کارکنان تعمیر و نگهداری را می‌توان به قطعات یدکی نسبت داد. بررسی‌ها نشان داده است که درصد کمی از سازمان‌ها می‌توانند بگویند در ۹۵٪ مواقع به قطعه دسترسی داشته‌اند. طولانی بودن فرآیند تامین قطعات، دقیق نبودن محاسبات کنترل موجودی و خرید، مشخص نبودن اهمیت هر قطعه و ... تعدادی از مسائلی است که شرکت‌ها به‌صورت روزانه با آن مواجه هستند. هدف از مدیریت قطعات یدکی تامین قطعات مناسب، در مقدار مناسب، در مکان مناسب، در زمان مناسب، با کیفیت مناسب و با حداقل هزینه کل برای سازمان است. دامنه مدیریت قطعات یدکی، کلیه عملکردها را از زمان احساس نیاز به قطعه تا زمان مصرف آن شامل می‌شود. برخی از این عملیات‌ها، شناسایی و کدگذاری، طبقه‌بندی بحرانی بودن، خرید اقلام، بازرسی کیفیت کالای خریداری‌شده، سیاست‌های ذخیره‌سازی، مدیریت تامین‌کننده و ... می‌باشد [2]. در معروف‌ترین مدل‌های منتشرشده در حوزه تعالی نگهداری و تعمیرات و مدیریت دارایی‌های فیزیکی، عنصر مدیریت مواد و قطعات را می‌توان مشاهده نمود. همچنین در مدل تعالی نگهداری و تعمیرات وایرمن^۱ در ذیل قسمت تدارکات و ذخیره‌سازی به مدیریت مواد و قطعاتی که در نگهداشت و بهره‌برداری از تجهیزات کاربرد دارند، توجه شده است [3]. هدف از تحقیق حاضر طراحی مدلی برای زنجیره‌تامین قطعات یدکی در یک سازمان دفاعی می‌باشد که شامل دو هدف کمینه‌سازی هزینه و زمان می‌باشد به‌طوری‌که تمام پارامترهای مدل به‌صورت غیرقطعی (فازی) باشند. سپس با کمک یک روش دقیق و یک روش فراابتکاری چندهدفه به حل آن می‌پردازیم.

۲- ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

۲-۱- مدیریت زنجیره‌تامین

مدیریت زنجیره‌تامین مجموعه‌ای از راهکارها، جهت یکپارچه‌سازی اعضای زنجیره (تامین‌کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان، خرده‌فروشان و مشتری نهایی) است که هدف آن، کاهش هزینه‌های سیستم و نیز افزایش سطح خدمت‌دهی به مشتریان است؛ بنابراین، زنجیره‌تامین به هر راهکاری که باعث کاهش هزینه‌ها می‌شود و نقشی در برآورده کردن نیاز مشتری ایفا می‌کند (از تامین‌کننده و امکانات تولیدی گرفته تا انبارهای مواد اولیه و مراکز توزیع و نیز خرده‌فروشی‌ها و انبارهای محصولات) توجه می‌کند، در واقع، در بعضی از تحلیل‌های زنجیره‌تامین ضروری است که توجه خود را به تامین‌کنندگان و مشتریان معطوف کنیم. بنابراین، مدیریت زنجیره‌تامین به دنبال یکپارچه‌سازی سازمان، از طریق اداره کردن تامین‌کنندگان و مشتریان به شکل یک "کل" می‌باشد و سپس همه جریان‌های موجود در این شبکه را هماهنگ می‌کند و در نتیجه این هماهنگی، محصول مناسب در اندازه و مقدار صحیح، برای مکان مناسب و در زمان صحیح، تولید و توزیع می‌شود [4].

۲-۲- قطعات یدکی

اکثر تحقیقات گذشته، نگهداری و تعمیرات را برپایه دسترسی نامحدود به قطعات یدکی در نظر می‌گرفتند. در نظر گرفتن این فرض، باعث بالا رفتن هزینه‌های موجودی می‌شود. با در نظر گرفتن سطح بهینه موجودی قطعات یدکی، می‌توان در میزان هزینه‌های موجودی، کاهش چشم‌گیری مشاهده کرد. در مدیریت و کنترل موجودی در سازمان‌ها، باید یک توازن بین سطح موجودی قطعات یدکی و هزینه و ریسک ناشی از عدم وجود قطعه به هنگام نیاز برقرار نمود. واضح است که این سطح از موجودی قطعات یدکی متأثر از خصوصیات دستگاه‌ها و قابلیت اطمینان آن‌ها است. رویکرد سنتی در بهینه‌سازی فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات و موجودی قطعات یدکی به‌صورت متوالی بود، یعنی به‌طور جداگانه فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات (فواصل بازرسی، تعویض پیشگیرانه، سرحد تعویض پیشگیرانه و ...) و موجودی قطعات یدکی بهینه می‌شدند [3].

سعیدی سوق و همکاران [3] در تحقیق خود به بهینه‌سازی ترکیبی موجودی قطعات یدکی و فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات پرداخته‌اند. در این مقاله، از شبیه‌سازی مونت‌کارلو به‌منظور بهینه‌سازی ترکیبی فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات مبتنی بر وضعیت و موجودی قطعات یدکی استفاده

¹ Terry Wireman

شده است. از الگوریتم ژنتیک باینری به منظور پیدا کردن مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم استفاده گردیده است. در مطالعه موردی برای شبیه سازی رویدادهای مختلف تعمیراتی، از بانک اطلاعاتی آنالیز روغن یک شرکت عمرانی شامل ۸۰۰۰ داده آنالیز روغن استفاده شده است.

عامری و همکاران [1] در پژوهش خود به منظور برخورد و مقابله با برخی چالش های موجود در رابطه با مدیریت قطعات یدکی بحرانی، مدلی ریاضی به منظور تعیین مقدار سفارش بهینه در حالت اختلال تامین کننده ارائه کردند. از این رو یک سیستم تولیدی دارای چند تجهیز مختلف با اجزای بحرانی در نظر گرفته شده است که اجزای بحرانی در صورت خرابی با قطعات یدکی سالم تعویض می شوند. مدل این مقاله در شرایط اختلال تامین کننده برای قطعات یدکی بحرانی بر پایه مدل فرآیند زنجیره مارکوف طراحی شد و برای حل این مدل از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

رحمتی و رمضان [5] به چارچوب ارزیابی سیستم مدیریت انبار قطعات یدکی و ارائه نقشه راه پرداخته اند. ابعاد و شاخص های چارچوب پیشنهادی از طریق مطالعه مدل های ارزیابی عملکرد و ادبیات پیشین و جلسات خبرگی به دست آمده است که شامل ۹ بعد و هر یک از ابعاد دارای ۱۰ شاخص و هریک از شاخص ها به چهار سطح، ۱ (سطح آگاهی)، ۲ (سطح تعریف)، ۳ (سطح مدیریت و اجرا) و ۴ (سطح تعالی) تقسیم می شوند.

حسین زاده و رمضان [2] به ارائه چارچوب مدیریت یکپارچه زنجیره تامین قطعات یدکی *MRO-iREAM*^۱ پرداخته اند. در این تحقیق ابتدا چارچوب های مدیریت قطعات یدکی مورد بررسی قرار گرفتند و سپس با استفاده از رویکرد گراند تئوری با ۱۲ نفر از خبرگان، مصاحبه شد. داده های پژوهش به کمک روش کدگذاری باز، محوری و انتخابی که از اجزای روش گراند تئوری است مورد تحلیل قرار گرفتند.

جایارمان و همکاران [6] یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط در مساله طراحی شبکه زنجیره تامین، تحت یک سیستم سفارش کشتی، بر اساس تقاضای مشتریان برای محصولات بازیابی شده، ارائه نموده اند. هدف از مدل ارائه شده، به حداقل رساندن هزینه کل است. در این مدل فرآیند تولید مجدد محصولات مرجوعی مورد بررسی قرار گرفته است.

کومار و کریگ [7] زنجیره تامین حلقه بسته شرکت *Dell* را مورد مطالعه قرار داده اند. آن ها همچنین تجزیه و تحلیل نقاط قوت، ضعف، فرصت ها و تهدیدات^۲ شرکت دل را بررسی کرده اند.

کاوالیری و همکاران [8] یک چارچوب تصمیم گیری برای مدیریت قطعات یدکی تعمیر و نگهداری ارائه داده اند. این چارچوب از پنج مرحله متوالی تشکیل شده است: ۱- کدگذاری بخش، ۲- طبقه بندی بخش، ۳- پیش بینی تقاضای بخشی، ۴- سیاست مدیریت سهام و ۵- آزمون سیاست و اعتبار.

گاریسیا بنیتو و مارتین پنیا [9] به مدلسازی توزیع مجدد قطعات یدکی در یک سازمان دفاعی پرداخته اند. در حوزه هایی مثل نظامی-دفاعی، دو جنبه متمایز وجود دارد: ۱- زمان حمل و نقل بین انبارهای فرعی بیشتر از زمان حمل بین انبار اصلی و یک انبار فرعی معین است و ۲- هزینه حمل و نقل ثابت است. این مطالعه موردی در ارتش اسپانیا صورت گرفته است و مدل پیشنهادی یک تحقیق نوآورانه بود.

کانتینی و همکاران [10] به پیکره بندی زنجیره تامین قطعات یدکی پرداخته اند. یک زنجیره تامین قطعات یدکی با پیکره بندی مناسب می تواند هزینه ها را کاهش داده و رقابت خرده فروشان قطعات یدکی را افزایش دهد. هدف این مقاله کمک به مدیران و دست اندرکاران در تعیین نحوه طراحی زنجیره تامین قطعات یدکی خود است، بنابراین هم پیکره بندی زنجیره تامین قطعات یدکی و هم فناوری ساخت را برای اتخاذ از طریق توسعه یک سیستم پشتیبانی تصمیم تعریف می کند.

در ادامه دسته بندی و خلاصه ای از تحقیقات صورت گرفته پیرامون موضوع تحقیق در جدول ۱ ارائه می گردد.

¹ Maintenance, Repair and Operation- Iranian Reliability Engineering and Asset Management (MRO-iREAM)

² Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats (SWOT)

جدول ۱ - دسته‌بندی و خلاصه‌ای از تحقیقات صورت گرفته پیرامون موضوع.
Table 1 - Classification and summary of research conducted on the topic.

روش شناسی	روش حل	تعداد اهداف			جنبه تحقیق و مدل‌سازی			ردیف			
		مطالعه موردی	چندهدفه	تک هدفه	مدلسازی ریاضی	برنامه‌ریزی فازی	برنامه‌ریزی استوار / احتمالی		تحقیق توصیفی	نویسندگان	سال
که تحقیق یکی از مباحث ضروری در زنجیره‌تامین یدکی در یک دفاعی می‌باشد، از نوع تحقیقات کاربردی است. اطلاعات موردنیاز این پژوهش از طریق مطالعات کتابخانه‌های (بررسی کتاب‌ها و اسناد و پایان‌نامه‌ها و	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	[11]	بشیری و شرافتی	1395
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	[12]	دهنا و باقری	1395
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	[13]	جهرمی و همکاران	1396
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	[3]	سعیدی سوق و همکاران	1397
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	[14]	صفار و همکاران	1397
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	[1]	عامری و همکاران	1398
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	[5]	رضائی و رحمتی	1401
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	[2]	حسین‌زاده و رضائی	1402
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	[15]	دمیرل و همکاران	2014
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	[16]	گوویندیان و همکاران	2015
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	[6]	جایارمان و همکاران	2015
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	[17]	تی و همکاران	2016
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	[7]	کومار و کریگ	2017
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	[8]	کاوالیری و همکاران	2020
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	[9]	گارسیا بنیتو و مارتین پینا	2021
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	[10]	کانتینی و همکاران	2024
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		تحقیق حاضر	1404

۳-

پژوهش

از آن جا حاضر مهم و حوزه قطعات سازمان

مقالات موجود) و نظرات کارشناسان امر و کسانی که در حوزه نگهداری و تعمیرات به طور مستقیم با قطعات یدکی در ارتباط هستند، به دست آمد و با قرار دادن مدل امیدی و همکاران [18] و مدل پیشوایی و ترابی [19] به عنوان مبنای کار، طراحی مدل تحقیق جاری انجام شد. در این پژوهش از نرم‌افزار ایمز و از *NSGA-II* و شبیه‌سازی تبرید چندهدفه^۱ برای حل مساله تامین قطعات یدکی استفاده شده است.

فرض‌های مدل

۱. مشتریان محصولات نو و دست‌دوم، یکسان می‌باشند.
۲. فضای حل مساله به صورت گسسته است.
۳. مقادیر کالاهای مرجوعی و تقاضای مشتریان غیرقطعی و فازی است.
۴. ظرفیت تسهیلات محدود است.
۵. مکان تامین‌کنندگان و مشتریان ثابت است و مکان تولید، مونتاژ، توزیع، جمع‌آوری، تعمیر، بازیافت و دفن و انهدام ثابت نیست. محصولات دست‌دوم کیفیت پایین‌تری نسبت به محصولات نو دارند.
۶. به تمامی مشتریان پاسخ داده می‌شود و تمام کالاهای مرجوعی جمع‌آوری می‌شوند.
۷. محصولات وارد شده در مراکز در هر دوره زمانی، در همان دوره از مرکز مربوطه خارج می‌شوند و وارد دوره بعدی نمی‌شوند.

مجموعه‌ها

$i \in I$: نقاط ثابت برای مراکز تامین‌کنندگان.

$j \in J$: نقاط بالقوه برای مراکز تولیدکنندگان.

$b \in B$: نقاط بالقوه برای مراکز مونتاژ.

$k \in K$: نقاط بالقوه برای مراکز توزیع.

$l \in L$: نقاط ثابت برای مراکز مشتریان.

$m \in M$: نقاط بالقوه برای مراکز جمع‌آوری.

$r \in R$: نقاط بالقوه برای مراکز تعمیر.

$p \in P$: نقاط بالقوه برای مراکز بازیافت.

$n \in N$: نقاط بالقوه برای مراکز دفن و انهدام.

$c \in C$: مجموعه قطعات به‌کار رفته در محصول.

پارامترها

جدول ۲- معرفی پارامترهای مدل.

Table 2- Introduction of model parameters.

¹ Multi-Objective Simulated Annealing (MOSA)

اندیس	اندیس	اندیس
\bar{Q}_{lt}	تقاضای محصول از مشتری l در دوره t	\widehat{CAP}_{ci}
Em	نرخ برگشتی محصول از مشتری l به مرکز جمع‌آوری m	\widehat{CAP}_{cj}
Tp	نرخ برگشتی محصول از مرکز تعمیر r به مرکز بازیافت p	\widehat{CAP}_{jj}
Rb	نرخ برگشتی محصول از مرکز تعمیر r به مرکز مونتاژ b	\widehat{CAP}_{cb}
An	نرخ برگشتی محصول از مرکز تعمیر r به مرکز دفن و انهدام n	\widehat{CAP}_{bb}
Zk	نرخ برگشتی محصول از مرکز تعمیر r به مرکز توزیع k	\widehat{CAP}_{kk}
\bar{F}_{jt}	هزینه اجاره مرکز توزیع j در دوره t	\widehat{CAP}_{kk}
\bar{F}_{bt}	هزینه اجاره مرکز مونتاژ b در دوره t	\widehat{CAP}_{mm}
\bar{F}_{kt}	هزینه اجاره مرکز توزیع k در دوره t	\widehat{CAP}_{rr}
\bar{F}_{mt}	هزینه اجاره مرکز جمع‌آوری m در دوره t	\widehat{CAP}_{nn}
\bar{F}_{rt}	هزینه اجاره مرکز تعمیر r در دوره t	\widehat{CAP}_{pp}
\bar{F}_{pt}	هزینه اجاره مرکز بازیافت p در دوره t	\widehat{T}_{ij}
\bar{F}_{nt}	هزینه اجاره مرکز دفن و انهدام n در دوره t	\widehat{T}_{cb}
\bar{C}_{ij}	هزینه جابه‌جایی هر جز c از مرکز تامین i به مرکز تولید j در دوره t	\widehat{T}_{bkt}
\bar{C}_{jbt}	هزینه جابه‌جایی هر جز c از مرکز تولید j به مرکز مونتاژ b در دوره t	\widehat{T}_{klt}
\bar{C}_{bkt}	هزینه جابه‌جایی هر محصول از مرکز مونتاژ b به مرکز توزیع k در دوره t	\widehat{T}_{lmt}
\bar{C}_{klt}	هزینه جابه‌جایی هر محصول از مرکز توزیع k به مرکز مشتری l در دوره t	\widehat{T}_{mrt}
\bar{C}_{lmt}	هزینه جابه‌جایی هر محصول از مشتری l به مرکز جمع‌آوری m در دوره t	\widehat{T}_{crpt}
\bar{C}_{klt}	هزینه جابه‌جایی هر محصول از مرکز توزیع k به مرکز مشتری l در دوره t	\widehat{T}_{crnt}
\bar{C}_{lmt}	هزینه جابه‌جایی هر محصول از مشتری l به مرکز جمع‌آوری m در دوره t	\widehat{T}_{crbt}
\bar{C}_{mrt}	هزینه جابه‌جایی هر محصول از مرکز جمع‌آوری m به مرکز تعمیر r در دوره t	\widehat{T}_{rkt}
\bar{C}_{crpt}	هزینه جابه‌جایی هر جز c از مرکز تعمیر r به مرکز بازیافت p در دوره t	\widehat{T}_{cpjt}
\bar{C}_{crnt}	هزینه جابه‌جایی هر محصول از مرکز جمع‌آوری m به مرکز تعمیر r در دوره t	r_c
\bar{C}_{crbt}	هزینه جابه‌جایی هر جز c از مرکز تعمیر r به مرکز بازیافت p در دوره t	
\bar{C}_{rkt}	هزینه جابه‌جایی هر محصول از مرکز تعمیر r به مرکز توزیع k در دوره t	
\bar{C}_{cpjt}	هزینه جابه‌جایی هر جز c از مرکز بازیافت p به مرکز تولید j در دوره t	

متغیرها

جدول ۳- معرفی متغیرهای مدل.

Table 2- Introduction of model variables.

متغیر	متغیر	متغیر
$YJ_{jt} = 1$	اگر مرکز تولید j در دوره t اجاره شود وگرنه صفر است.	XBK_{bkt}
$YB_{bt} = 1$	اگر مرکز مونتاژ b در دوره t اجاره شود وگرنه صفر است.	XKL_{klt}
$YK_{kt} = 1$	اگر مرکز توزیع k در دوره t اجاره شود وگرنه صفر است.	XLM_{lmt}
$YM_{mt} = 1$	اگر مرکز جمع‌آوری m در دوره t اجاره شود وگرنه صفر است.	XMR_{mrt}
$YR_{rt} = 1$	اگر مرکز تعمیر r در دوره t اجاره شود وگرنه صفر است.	XRP_{crpt}
$YP_{pt} = 1$	اگر مرکز بازیافت p در دوره t اجاره شود وگرنه صفر است.	XRN_{crnt}
$YN_{nt} = 1$	اگر مرکز دفن و انهدام n در دوره t اجاره شود وگرنه صفر است.	XRB_{crbt}
XI_{cijt}	مقدار جریان هر جز c از مرکز تامین i به مرکز تولید j در دوره t	XRK_{rkt}
XJB_{cjb}	مقدار جریان هر جز c از مرکز تولید j به مرکز مونتاژ b در دوره t	XPJ_{cpjt}

۱-۳- مدل ریاضی مساله

با استفاده از نمادهای فوق می‌توان مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای طراحی شبکه زنجیره‌تامین ارایه کرد که با هدف حداقل‌سازی هزینه‌ها و حداقل‌سازی زمان به‌صورت زیر ارایه می‌شود:

$$\begin{aligned}
 \min f_1 = & \sum_j \sum_t \bar{F}J_{jt} YJ_{jt} + \sum_b \sum_t \bar{F}B_{bt} YB_{bt} + \sum_k \sum_t \bar{F}K_{kt} YK_{kt} + \sum_m \sum_t \bar{F}M_{mt} YM_{mt} \\
 & + \sum_r \sum_t \bar{F}R_{rt} YR_{rt} + \sum_p \sum_t \bar{F}P_{pt} YP_{pt} + \sum_n \sum_t \bar{F}N_{nt} YN_{nt} + \\
 & \sum_c \sum_j \sum_b \sum_t (\bar{C}J_{cjb} \cdot XJB_{cjb}) + \sum_c \sum_i \sum_j \sum_t (\bar{C}I_{cijt} \cdot XI_{cijt}) + \\
 & \sum_b \sum_k \sum_t (\bar{C}BK_{bkt} \cdot XBK_{bkt}) + \sum_k \sum_l \sum_t (\bar{C}KL_{klt} \cdot XKL_{klt}) + \\
 & \sum_l \sum_m \sum_t (\bar{C}LM_{lmt} \cdot XLM_{lmt}) + \sum_m \sum_r \sum_t (\bar{C}MR_{mrt} \cdot XMR_{mrt}) + \\
 & \sum_c \sum_r \sum_p \sum_t (\bar{C}RP_{crpt} \cdot XRP_{crpt}) + \sum_c \sum_p \sum_j \sum_t (\bar{C}PJ_{cpjt} \cdot XPJ_{cpjt}) + \\
 & \sum_c \sum_r \sum_b \sum_t (\bar{C}RB_{crbt} \cdot XRB_{crbt}) + \sum_r \sum_k \sum_t (\bar{C}RK_{rkt} \cdot XRK_{rkt}) + \\
 & \sum_c \sum_r \sum_n \sum_t (\bar{C}RN_{crnt} \cdot XRN_{crnt}).
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \min f_2 = & \sum_r \sum_i \sum_j \sum_t \widetilde{T}I_{cijt} \cdot XIJ_{cijt} + \sum_c \sum_j \sum_b \sum_t \widetilde{T}JB_{cjb} \cdot XJB_{cjb} + \\ & \sum_b \sum_k \sum_t \widetilde{T}BK_{bkt} \cdot XBK_{bkt} + \sum_k \sum_l \sum_t \widetilde{T}KL_{klt} \cdot XKL_{klt} + \sum_l \sum_m \sum_t \widetilde{T}LM_{lmt} \cdot XLM_{lmt} \\ & \sum_m \sum_r \sum_t \widetilde{T}MR_{mrt} \cdot XMR_{mrt} + \sum_c \sum_r \sum_p \sum_t \widetilde{T}RP_{crpt} \cdot XRP_{crpt} + \quad (۲) \\ & \sum_c \sum_p \sum_j \sum_t \widetilde{T}PJ_{cpjt} \cdot XPJ_{cpjt} + \sum_c \sum_r \sum_b \sum_t \widetilde{T}RB_{crbt} \cdot XRB_{crbt} + \\ & \sum_r \sum_k \sum_t \widetilde{T}RK_{rkt} \cdot XRK_{rkt} + \sum_c \sum_r \sum_n \sum_t \widetilde{T}RN_{crnt} \cdot XRN_{crnt}. \\ & s. t. \\ & \sum_k XKL_{klt} \geq \widetilde{Q}_{lt}, \quad \text{for all } l \in L, \text{ for all } t \in T. \quad (۳) \\ & \sum_m XLM_{lmt} \geq Em \cdot \widetilde{Q}_{lt}, \quad \text{for all } l \in L, \text{ for all } t \in T. \quad (۴) \\ & \sum_r XMR_{mrt} = \sum_l XLM_{lmt}, \quad \text{for all } m \in M, \text{ for all } t \in T. \quad (۵) \\ & \sum_k XRK_{rkt} = ZK \sum_m XMR_{mrt}, \quad \text{for all } r \in R, \text{ for all } t \in T. \quad (۶) \\ & \sum_b XRB_{crbt} = r_c * Rb \sum_m XMR_{mrt}, \quad \text{for all } c \in C, \text{ for all } r \in R, \text{ for all } t \in T. \quad (۷) \\ & \sum_p XRP_{crpt} = r_c * Tp \sum_m XMR_{mrt}, \quad \text{for all } c \in C, \text{ for all } r \in R, \text{ for all } t \in T. \quad (۸) \\ & \sum_n XRN_{crnt} = r_c * An \sum_m XMR_{mrt}, \quad \text{for all } c \in C, \text{ for all } r \in R, \text{ for all } t \in T. \quad (۹) \\ & \sum_j XPJ_{cpjt} = \sum_r XRP_{crpt}, \quad \text{for all } c \in C, \text{ for all } p \in P, \text{ for all } t \in T. \quad (۱۰) \\ & \sum_i XIJ_{cijt} + \sum_p XPJ_{cpjt} = \sum_b XJB_{cjb} \cdot t, \quad \text{for all } c \in C, \text{ for all } j \in J, \text{ for all } t \in T. \quad (۱۱) \\ & \sum_j XJB_{cjb} + \sum_r XRB_{crbt} = r_c * \sum_k XBK_{bkt}, \quad \text{for all } c \in C, \text{ for all } b \in B, \text{ for all } t \in T. \quad (۱۲) \\ & \sum_b XBK_{bkt} + \sum_r XRK_{rkt} = \sum_l XKL_{klt}, \quad \text{for all } k \in K, \text{ for all } t \in T. \quad (۱۳) \\ & \sum_j XIJ_{cijt} \leq \widetilde{CAPI}_{ci}, \quad \text{for all } c \in C, \text{ for all } i \in I, \text{ for all } t \in T. \quad (۱۴) \\ & \sum_t XIJ_{cijt} \leq \widetilde{CAPJ}_{cj} YJ_{jt}, \quad \text{for all } c \in C, \text{ for all } j \in J, \quad \text{for all } t \in T. \quad (۱۵) \\ & \sum_j XJB_{cjb} \leq \widetilde{CAPB}_{cb} YB_{bt}, \quad \text{for all } c \in C, \text{ for all } b \in B, \text{ for all } t \in T. \quad (۱۶) \\ & \sum_b XBK_{bkt} \leq \widetilde{CAPK}_k YK_{kt}, \quad \text{for all } k \in K, \text{ for all } t \in T. \quad (۱۷) \\ & \sum_l XLM_{lmt} \leq \widetilde{CAPM}_m YM_{mt}, \quad \text{for all } m \in M, \text{ for all } t \in T. \quad (۱۸) \\ & \sum_m XMR_{mrt} \leq \widetilde{CAPR}_r YR_{rt}, \quad \text{for all } r \in R, \quad \text{for all } t \in T. \quad (۱۹) \\ & \sum_r XRP_{crpt} \leq \widetilde{CAPP}_{cp} YP_{pt}, \quad \text{for all } c \in C, \text{ for all } p \in P, \text{ for all } t \in T. \quad (۲۰) \end{aligned}$$

$$\sum_r XRN_{crnt} \leq \widehat{CAPN}_{cn} YN_{nt}, \quad \text{for all } c \in C, \text{ for all } n \in N, \text{ for all } t \in T. \quad (21)$$

$$\sum_p XPJ_{cpjt} \leq \widehat{CAPJ}_{cj} YJ_{jt}, \quad \text{for all } c \in C, \text{ for all } j \in J, \quad \text{for all } t \in T. \quad (22)$$

$$\sum_r XRB_{crbt} \leq \widehat{CAPB}_{cb} YB_{bt}, \quad \text{for all } c \in C, \text{ for all } b \in B, \quad \text{for all } t \in T. \quad (23)$$

$$\sum_r XRK_{rkt} \leq \widehat{CAPK}_{k} YK_{kt}, \quad \text{for all } k \in K, \quad \text{for all } t \in T. \quad (24)$$

$$\sum_j YJ_{jt} \geq 1, \quad \text{for all } t \in T. \quad (25)$$

$$\sum_b YB_{bt} \geq 1, \quad \text{for all } t \in T. \quad (26)$$

$$\sum_k YK_{kt} \geq 1, \quad \text{for all } t \in T. \quad (27)$$

$$\sum_m YM_{mt} \geq 1, \quad \text{for all } t \in T. \quad (28)$$

$$\sum_r YR_{rt} \geq 1, \quad \text{for all } t \in T. \quad (29)$$

$$\sum_p YP_{pt} \geq 1, \quad \text{for all } t \in T. \quad (30)$$

$$\sum_n YN_{nt} \geq 1, \quad \text{for all } t \in T. \quad (31)$$

$$Rb + ZK + Tp + An = 1. \quad (32)$$

تابع هدف (۱) نشان دهنده حداقل سازی هزینه های جابه جایی و حمل و نقل محصولات و هزینه اجاره مراکز در هر دوره می باشد. تابع هدف (۲) سعی در کمیته سازی زمان های حمل و نقل بین مراکز در هر دوره دارد. محدودیت (۳) تضمین می کند که در جریان مستقیم تقاضای مشتریان پاسخ داده شود. محدودیت (۴) تضمین می کند در جریان برگشتی تمام محصولات (یک نوع محصول) مرجوعی جمع آوری شده و به محل جمع آوری منتقل شود. محدودیت (۵) تضمین می کند محصولات وارد شده به محل جمع آوری برابر محصولات خارج شده از آن می باشند. محدودیت (۶) تا محدودیت (۹) تضمین می کنند محصولات وارد شده به محل تعمیر برابر محصولات خارج شده از آن می باشند. محدودیت (۱۰) تضمین می کند قطعات وارد شده به مرکز بازیافت برابر قطعات خارج شده از آن می باشند. محدودیت (۱۱) تضمین می کند قطعات وارد شده به مرکز تولید برابر قطعات خارج شده از آن می باشند. محدودیت (۱۲) تضمین می کند قطعات وارد شده به محل مونتاژ برابر قطعات خارج شده از آن می باشند. محدودیت (۱۳) تضمین می کند محصولات وارد شده به محل توزیع برابر محصولات خارج شده از آن می باشند. محدودیت (۱۴) تا محدودیت (۲۴) تضمین می کنند که جریان تنها بین نقاطی در جریان باشد که در آن تسهیلی اجاره شده باشد و به ترتیب مربوط به محدودیت های ظرفیت مراکز تامین کننده، تولید کننده، مونتاژ، توزیع کننده، جمع آوری، تعمیر، بازیافت، دفن و انهدام، ظرفیت قطعات مرجوعی رسیده از مرکز بازیافت در مراکز تولید، ظرفیت قطعات مرجوعی رسیده از مرکز تعمیر در مراکز مونتاژ و همچنین ظرفیت محصولات مرجوعی رسیده از مرکز تعمیر در مراکز توزیع می باشند. محدودیت (۲۵) تا محدودیت (۳۱) تضمین می کنند که حداقل یکی از مراکز تولید، مونتاژ، توزیع، جمع آوری، تعمیر، بازیافت و دفن و انهدام اجاره شود. محدودیت (۳۲) تضمین می کند مجموع ضرایب محصولات و قطعات خارج شده از مرکز تعمیر برابر ۱ باشد.

۲-۳- تبدیل مدل فازی به قطعی

روش های متعددی برای تبدیل مدل با پارامترهای غیر قطعی به مدل با پارامترهای قطعی وجود دارد که در این تحقیق از روش خیمنز و همکاران [20] به دلیل کارایی مناسب آن در مسایل خطی فازی، مورد استفاده قرار می گیرد. تمام پارامترهای فازی مدل ریاضی توسط رابطه (۳۳) به پارامتر قطعی تبدیل می شوند:

$$M_c(x) = \begin{cases} f_c(x) = \frac{x - c^p}{c^m - c^p}, & \text{if } c^p \leq x \leq c^m, \\ 1, & \text{if } c^m \leq x \leq c^n, \\ g_c(x) = \frac{c^o - x}{c^o - c^n}, & \text{if } c^n \leq x \leq c^o, \\ 0, & \text{if } x \leq c^p \text{ or } x \geq c^o. \end{cases} \quad (۳۳)$$

$$\begin{aligned} \min f1 = & \sum_j \sum_t \left(\frac{FJ_{jt}^1 + FJ_{jt}^2 + FJ_{jt}^3 + FJ_{jt}^4}{4} \right) YJ_{jt} + \sum_b \sum_t \left(\frac{FB_{bt}^1 + FB_{bt}^2 + FB_{bt}^3 + FB_{bt}^4}{4} \right) YB_{bt} + \\ & \sum_k \sum_t \left(\frac{FK_{kt}^1 + FK_{kt}^2 + FK_{kt}^3 + FK_{kt}^4}{4} \right) YK_{kt} + \sum_m \sum_t \left(\frac{FM_{mt}^1 + FM_{mt}^2 + FM_{mt}^3 + FM_{mt}^4}{4} \right) YM_{mt} + \\ & \sum_r \sum_t \left(\frac{FR_{rt}^1 + FR_{rt}^2 + FR_{rt}^3 + FR_{rt}^4}{4} \right) YR_{rt} + \sum_p \sum_t \left(\frac{FP_{pt}^1 + FP_{pt}^2 + FP_{pt}^3 + FP_{pt}^4}{4} \right) YP_{pt} + \\ & \sum_n \sum_t \left(\frac{FN_{nt}^1 + FN_{nt}^2 + FN_{nt}^3 + FN_{nt}^4}{4} \right) YN_{nt} + \sum_c \sum_i \sum_j \sum_t \left(\frac{CIJ_{cijt}^1 + CIJ_{cijt}^2 + CIJ_{cijt}^3 + CIJ_{cijt}^4}{4} \right) . XIJ_{cijt} + \\ & \sum_c \sum_j \sum_b \sum_t \left(\frac{CJB_{cjb t}^1 + CJB_{cjb t}^2 + CJB_{cjb t}^3 + CJB_{cjb t}^4}{4} \right) . XJB_{cjb t} + \sum_b \sum_k \sum_t \left(\frac{CBK_{bkt}^1 + CBK_{bkt}^2 + CBK_{bkt}^3 + CBK_{bkt}^4}{4} \right) . XBK_{bkt} + \\ & \sum_k \sum_l \sum_t \left(\frac{CKL_{klt}^1 + CKL_{klt}^2 + CKL_{klt}^3 + CKL_{klt}^4}{4} \right) . XKL_{klt} + \\ & \sum_l \sum_m \sum_t \left(\frac{CLM_{lmt}^1 + CLM_{lmt}^2 + CLM_{lmt}^3 + CLM_{lmt}^4}{4} \right) . XLM_{lmt} + \\ & \sum_m \sum_r \sum_t \left(\frac{CMR_{mrt}^1 + CMR_{mrt}^2 + CMR_{mrt}^3 + CMR_{mrt}^4}{4} \right) . XMR_{mrt} + \\ & \sum_c \sum_r \sum_p \sum_t \left(\frac{CRP_{crpt}^1 + CRP_{crpt}^2 + CRP_{crpt}^3 + CRP_{crpt}^4}{4} \right) . XRP_{crpt} + \\ & \sum_c \sum_r \sum_n \sum_t \left(\frac{CRN_{crnt}^1 + CRN_{crnt}^2 + CRN_{crnt}^3 + CRN_{crnt}^4}{4} \right) . XRN_{crnt} + \\ & \sum_c \sum_r \sum_b \sum_t \left(\frac{CRB_{crbt}^1 + CRB_{crbt}^2 + CRB_{crbt}^3 + CRB_{crbt}^4}{4} \right) . XRB_{crbt} + \\ & \sum_r \sum_k \sum_t \left(\frac{CRK_{rkt}^1 + CRK_{rkt}^2 + CRK_{rkt}^3 + CRK_{rkt}^4}{4} \right) . XRK_{rkt} + \\ & \sum_c \sum_p \sum_j \sum_t \left(\frac{CPJ_{cpjt}^1 + CPJ_{cpjt}^2 + CPJ_{cpjt}^3 + CPJ_{cpjt}^4}{4} \right) . XPJ_{cpjt}. \end{aligned} \quad (۳۴)$$

$$\begin{aligned} \min f2 = & \sum_c \sum_i \sum_j \sum_t \left(\frac{TIJ_{cijt}^1 + TIJ_{cijt}^2 + TIJ_{cijt}^3 + TIJ_{cijt}^4}{4} \right) . XIJ_{cijt} \\ & + \sum_c \sum_j \sum_b \sum_t \left(\frac{TJB_{cjb t}^1 + TJB_{cjb t}^2 + TJB_{cjb t}^3 + TJB_{cjb t}^4}{4} \right) . XJB_{cjb t} + \\ & \sum_b \sum_k \sum_t \left(\frac{TBK_{bkt}^1 + TBK_{bkt}^2 + TBK_{bkt}^3 + TBK_{bkt}^4}{4} \right) . XBK_{bkt} + \sum_k \sum_l \sum_t \left(\frac{TKL_{klt}^1 + TKL_{klt}^2 + TKL_{klt}^3 + TKL_{klt}^4}{4} \right) . XKL_{klt} + \\ & \sum_l \sum_m \sum_t \left(\frac{TLM_{lmt}^1 + TLM_{lmt}^2 + TLM_{lmt}^3 + TLM_{lmt}^4}{4} \right) . XLM_{lmt} \\ & + \sum_m \sum_r \sum_t \left(\frac{TMR_{mrt}^1 + TMR_{mrt}^2 + TMR_{mrt}^3 + TMR_{mrt}^4}{4} \right) . XMR_{mrt} + \\ & \sum_c \sum_r \sum_p \sum_t \left(\frac{TRP_{crpt}^1 + TRP_{crpt}^2 + TRP_{crpt}^3 + TRP_{crpt}^4}{4} \right) . XRP_{crpt} \\ & + \sum_c \sum_r \sum_n \sum_t \left(\frac{TRN_{crnt}^1 + TRN_{crnt}^2 + TRN_{crnt}^3 + TRN_{crnt}^4}{4} \right) . XRN_{crnt} + \\ & \sum_c \sum_r \sum_b \sum_t \left(\frac{TRB_{crbt}^1 + TRB_{crbt}^2 + TRB_{crbt}^3 + TRB_{crbt}^4}{4} \right) . XRB_{crbt} + \\ & \sum_r \sum_k \sum_t \left(\frac{TRK_{rkt}^1 + TRK_{rkt}^2 + TRK_{rkt}^3 + TRK_{rkt}^4}{4} \right) . XRK_{rkt} + \\ & \sum_c \sum_p \sum_j \sum_t \left(\frac{TPJ_{cpjt}^1 + TPJ_{cpjt}^2 + TPJ_{cpjt}^3 + TPJ_{cpjt}^4}{4} \right) . Xcpjt. \end{aligned} \quad (۳۵)$$

$$\sum_k XKL_{klt} \geq \alpha \frac{Q_{lt}^3 + Q_{lt}^4}{2} + (1 - \alpha) \frac{Q_{lt}^1 + Q_{lt}^2}{2}, \quad \text{for all } l \in L, \text{ for all } t \in T. \quad (36)$$

$$\sum_m XLM_{lmt} \geq Em. \left(\alpha \frac{Q_{lt}^3 + Q_{lt}^4}{2} + (1 - \alpha) \frac{Q_{lt}^1 + Q_{lt}^2}{2} \right), \quad \text{for all } l \in L, \text{ for all } t \in T. \quad (37)$$

$$\sum_r XMR_{mrt} = \sum_l XLM_{lmt}, \quad \text{for all } m \in M, \text{ for all } t \in T, \quad (38)$$

$$\sum_k XRR_{rkt} = ZK \sum_m XMR_{mrt}, \quad \text{for all } r \in R, \text{ for all } t \in T. \quad (39)$$

$$\sum_b XRB_{crbt} = r_c * Rj \sum_m XMR_{mrt}, \quad \text{for all } c \in C, \text{ for all } r \in R, \text{ for all } t \in T. \quad (40)$$

$$\sum_p XRP_{crpt} = r_c * Tp \sum_m XMR_{mrt}, \quad \text{for all } c \in C, \text{ for all } r \in R, \text{ for all } t \in T. \quad (41)$$

$$\sum_n XRN_{crnt} = r_c * An \sum_m XMR_{mrt}, \quad \text{for all } c \in C, \text{ for all } r \in R, \text{ for all } t \in T. \quad (42)$$

$$\sum_j XPJ_{cpjt} = \sum_r XRP_{crpt}, \quad \text{for all } c \in C, \quad \text{for all } p \in P, \text{ for all } t \in T. \quad (43)$$

$$\sum_i XIJ_{cijt} + \sum_p XPJ_{cpjt} = \sum_b XJB_{cbjt}, \quad \text{for all } c \in C, \text{ for all } j \in J, \text{ for all } t \in T. \quad (44)$$

$$\sum_j XJB_{cbjt} + \sum_r XRB_{crbt} = r_c * \sum_k XBK_{bkt}, \quad \text{for all } c \in C, \text{ for all } b \in B, \text{ for all } t \in T. \quad (45)$$

$$\sum_b XBK_{bkt} + \sum_r XRR_{rkt} = \sum_l XKL_{klt}, \quad \text{for all } k \in K, \text{ for all } t \in T. \quad (46)$$

$$\sum_j XIJ_{cijt} \leq \left[\alpha \frac{CAPI_{ci}^1 + CAPI_{ci}^2}{2} + (1 - \alpha) \frac{CAPI_{ci}^3 + CAPI_{ci}^4}{2} \right], \quad \text{for all } c \in C, \text{ for all } i \in I, \quad \text{for all } t \in T. \quad (47)$$

$$\sum_i XIJ_{cijt} \leq \left[\alpha \frac{CAPJ_{cj}^1 + CAPJ_{cj}^2}{2} + (1 - \alpha) \frac{CAPJ_{cj}^3 + CAPJ_{cj}^4}{2} \right] . YJ_{jt}, \quad \text{for all } c \in C, \text{ for all } j \in J, \quad \text{for all } t \in T. \quad (48)$$

$$\sum_k XJB_{cbjt} \leq \left[\alpha \frac{CABP_{cb}^1 + CABP_{cb}^2}{2} + (1 - \alpha) \frac{CABP_{cb}^3 + CABP_{cb}^4}{2} \right] . YB_{bt}, \quad \text{for all } c \in C, \text{ for all } b \in B, \quad \text{for all } t \in T. \quad (49)$$

$$\sum_b XBK_{bkt} \leq \left[\alpha \frac{CAPK_{k+}^1 + CAPK_{k+}^2}{2} + (1 - \alpha) \frac{CAPK_{k+}^3 + CAPK_{k+}^4}{2} \right] . YK_{kt}, \quad \text{for all } k \in K, \text{ for all } t \in T. \quad (50)$$

$$\sum_l XLM_{lmt} \leq \left[\alpha \frac{CAPM_m^1 + CAPM_m^2}{2} + (1 - \alpha) \frac{CAPM_m^3 + CAPM_m^4}{2} \right] . YM_{mt}, \quad \text{for all } m \in M, \text{ for all } t \in T. \quad (51)$$

$$\sum_m XMR_{mrt} \leq \left[\alpha \frac{CAPR_r^1 + CAPR_r^2}{2} + (1 - \alpha) \frac{CAPR_r^3 + CAPR_r^4}{2} \right] . YR_{rt}, \quad \text{for all } r \in R, \quad \text{for all } t \in T. \quad (52)$$

$$\sum_r XRP_{crpt} \leq \left[\alpha \frac{CAPP_{cp}^1 + CAPP_{cp}^2}{2} + (1 - \alpha) \frac{CAPP_{cp}^3 + CAPP_{cp}^4}{2} \right] . YP_{pt}, \quad \text{for all } c \in C, \text{ for all } p \in P, \text{ for all } t \in T. \quad (53)$$

$$\sum_r XRN_{crnt} \leq \left[\alpha \frac{CAPN_{cn}^1 + CAPN_{cn}^2}{2} + (1 - \alpha) \frac{CAPN_{cn}^3 + CAPN_{cn}^4}{2} \right] \cdot YN_{nt}, \quad \text{for all } c \in C, \text{ for all } n \in N, \text{ for all } t \in T. \quad (54)$$

$$\sum_p XPJ_{cpt} \leq \left[\alpha \frac{CAPJJ_{cj}^1 + CAPJJ_{cj}^2}{2} + (1 - \alpha) \frac{CAPJJ_{cj}^3 + CAPJJ_{cj}^4}{2} \right] \cdot YJ_{jt}, \quad \text{for all } c \in C, \text{ for all } j \in J, \text{ for all } t \in T. \quad (55)$$

$$\sum_r XRB_{crbt} \leq \left[\alpha \frac{CAPBB_{cb}^1 + CAPBB_{cb}^2}{2} + (1 - \alpha) \frac{CAPBB_{cb}^3 + CAPBB_{cb}^4}{2} \right] \cdot YB_{bt}, \quad \text{for all } c \in C \text{ for all } b \in B \text{ for all } t \in T. \quad (56)$$

$$\sum_r XRK_{rkt} \leq \left[\alpha \frac{CAPKK_k^1 + CAPKK_k^2}{2} + (1 - \alpha) \frac{CAPKK_k^3 + CAPKK_k^4}{2} \right] \cdot YK_{kt}, \quad \text{for all } k \in K, \text{ for all } t \in T. \quad (57)$$

$$\sum_j YJ_{jt} \geq 1, \quad \text{for all } t \in T. \quad (58)$$

$$\sum_b YB_{bt} \geq 1, \quad \text{for all } t \in T. \quad (59)$$

$$\sum_k YK_{kt} \geq 1, \quad \text{for all } t \in T. \quad (60)$$

$$\sum_m YM_{mt} \geq 1, \quad \text{for all } t \in T. \quad (61)$$

$$\sum_r YR_{rt} \geq 1, \quad \text{for all } t \in T. \quad (62)$$

$$\sum_p YP_{pt} \geq 1, \quad \text{for all } t \in T. \quad (63)$$

$$\sum_n YN_{nt} \geq 1, \quad \text{for all } t \in T. \quad (64)$$

$$Rj + ZK + Tp + An = 1. \quad (65)$$

۳-۳- الگوریتم ژنتیک چندهدفه

الگوریتم ژنتیک یکی از الگوریتم‌های اکتشافی حل مساله است که از مدل‌سازی زیستی جمعیت جانداران به وجود آمده است. در این الگوریتم، خصوصیات نسل جانداران به مقدار توابع هدف و بهبود در خصوصیات نسلی در پی گذشت زمان تشبیه و ظهور نسل‌های جدید از آمیزش نسل‌های قبلی به بهبود در مقدار توابع هدف مانند شده است. به عبارت دیگر این الگوریتم از اصول انتخاب طبیعی داروین برای یافتن فرمول یا جواب بهینه به منظور پیش‌بینی یا تطبیق الگو استفاده می‌کند. روش کار و الگوریتم کلی *NSGA-II* که یکی از حالت‌های چندهدفه الگوریتم ژنتیک می‌باشد، به شرح ذیل است [21]:

۱. ایجاد جمعیت اولیه
۲. محاسبه معیارهای برازندگی
۳. مرتب کردن جمعیت بر اساس شرط‌های غلبه کردن
۴. محاسبه فاصله ازدحامی^۱
۵. انتخاب: به محض این‌که جمعیت اولیه بر اساس شرط‌های غلبه کردن مرتب شد، مقدار فاصله ازدحامی در آن محاسبه خواهد شد و انتخاب از میان جمعیت اولیه آغاز می‌شود. این انتخاب بر اساس دو المان صورت می‌پذیرد: رتبه جمعیت و محاسبه فاصله
۶. انجام تقاطع و جهش برای تولید فرزندان جدید
۷. تلفیق جمعیت اولیه و جمعیت به دست آمده از تقاطع و جهش

¹ Crowding distance

۸. جایگزین کردن جمعیت والدین با بهترین اعضای جمعیت تلفیق شده در مراحل قبل
۹. تمامی مراحل تا نسل (و یا شرایط بهینگی) مورد نظر تکرار می‌شوند

پارامترهای کنترلی الگوریتم *NSGA-II* پیشنهادی، شامل تعداد تکرار الگوریتم، اندازه (سایز) جمعیت، درصد تقاطع، تعداد تقاطع، درصد جهش، تعداد جهش، نرخ جهش و شیوه انتخاب والد و جهش می‌باشد. مقادیر پارامترهای مربوط به الگوریتم ژنتیک چندهدفه در جدول ۴ نشان داده شده است. برای تنظیم پارامترهای کنترلی الگوریتم با استفاده از روش تاگوچی و سعی و خطا، پارامترهای کنترلی الگوریتم مربوطه به دست آمده است.

جدول ۴- داده‌های مربوط به پارامترهای کنترلی الگوریتم *NSGA-II*.
Table 4- Data related to the control parameters of the *NSGA-II* algorithm.

مقدار داده یا روش تولید داده‌ها	پارامتر	موجودیت
50	تعداد تکرار الگوریتم	کنترل برنامه
200	اندازه جمعیت	
0.5	درصد تقاطع	
$2 * \text{round} (p\text{Crossover} * n\text{Pop} / 2)$	تعداد تقاطع	
0.3	درصد جهش	
$\text{Round} (p\text{Mutation} * n\text{Pop})$	تعداد جهش	
تورنمنت دوتایی	روش انتخاب والد و جهش	

۴- یافته‌ها

۴-۱- اعتبارسنجی الگوریتم فراابتکاری *NSGA-II* با روش دقیق

به منظور اثبات کارایی الگوریتم فراابتکاری، نتایج حل الگوریتم *NSGA-II* در حالت چندهدفه با نتایج حل به وسیله نرم افزار ایمز مقایسه می‌شوند. برای این منظور چند مساله نمونه طراحی شده و به ازای درجه α (تا $\alpha=0.1$ تا $\alpha=0.9$) به وسیله الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی حل گردیده است. با توجه به این که روش دقیق پیشنهادی، قادر به بهینه‌سازی هم‌زمان هر دو تابع هدف نمی‌باشد، لذا دو تابع هدف را از طریق هم‌فاز کردن، به یک تابع هدف تبدیل می‌نماییم و برای این کار از تابع *LP-Metric* مطابق رابطه (۶۶) بهره می‌گیریم.

$$\text{min}z^* = \left[\sum_k \lambda_k \left(\frac{f_k - f_k^{\min}}{f_k^{\max} - f_k^{\min}} \right)^p + \sum_l \lambda_l \left(\frac{f_l^{\max} - f_l}{f_l^{\max}} \right)^p \right]^{\frac{1}{p}} \quad (66)$$

ابعاد مسایل آزمایشی به کار رفته در مدل مربوطه در جدول ۵ نشان داده شده است. نتایج حاصل از حل مسایل آزمایشی مورد نظر در جدول ۶ برای تابع هدف *F1* و *F2* در هر دوره نشان داده شده است. جدول ۷ متوسط درصد اختلاف نتایج حاصل از الگوریتم فراابتکاری را با نرم افزار ایمز نشان می‌دهد. جدول ۸ و شکل ۱ متوسط زمان اجرای هر یک از مسایل توسط نرم افزار ایمز و الگوریتم فراابتکاری را نشان می‌دهد.

جدول ۵- ابعاد مسایل آزمایشی.

Table 5- Dimensions of experimental problems.

شماره مسایل	تامین کننده	مرکز تولید	مرکز مونتاژ	مرکز توزیع	مشتریان	مرکز جمع آوری	مرکز تعمیر	مرکز بازیافت	مرکز دفن و انهدام
P ₁₁ -P ₁₉	5	6	7	7	29	6	7	5	4
P ₂₁ -P ₂₉	5	6	7	8	40	7	7	5	4
P ₃₁ -P ₃₉	7	8	9	10	60	9	9	7	4

جدول ۶- مقایسه الگوریتم فراابتکاری و حل دقیق ایمز در مساله آزمایشی.

Table 6 - Comparison of metaheuristic algorithm and exact solution of Aimms in the experimental problem.

NSGA-II	Aimms	NSGA-II	Aimms	درجه α	شماره مساله
F ₂	F ₂	F ₁	F ₁		
15653946	15653946	5591078	5590315	$\alpha=0.1$	P ₁₁
15933980	15933481	5683412	5682607	$\alpha=0.2$	P ₁₂
16213348	16213016	5775565	5774899	$\alpha=0.3$	P ₁₃
16503367	16492550	5867235	5867190	$\alpha=0.4$	P ₁₄
16772363	16772363	5960147	5959759	$\alpha=0.5$	P ₁₅
17054463	17053960	6173479	6164283	$\alpha=0.6$	P ₁₆
17351420	17337548	6332843	6332747	$\alpha=0.7$	P ₁₇
17634111	17621714	6430163	6430117	$\alpha=0.8$	P ₁₈
17913633	17906050	6527835	6527493	$\alpha=0.9$	P ₁₉
21634422	21629950	7769650	7769650	$\alpha=0.1$	P ₂₁
22027383	22022299	7903865	7903865	$\alpha=0.2$	P ₂₂
22414648	22414648	8047548	8038080	$\alpha=0.3$	P ₂₃
22813305	22806997	8172296	8172296	$\alpha=0.4$	P ₂₄
23199346	23199346	8315271	8306511	$\alpha=0.5$	P ₂₅
23599067	23591695	8440726	8440726	$\alpha=0.6$	P ₂₆
23992188	23984044	8574941	8574941	$\alpha=0.7$	P ₂₇
24385149	24376393	8709156	8709156	$\alpha=0.8$	P ₂₈
24778110	24768742	8843372	8843372	$\alpha=0.9$	P ₂₉
32460568	32458400	11369448	11363432	$\alpha=0.1$	P ₃₁
33045003	33040592	11558608	11558608	$\alpha=0.2$	P ₃₂
33627899	33622799	11794260	11793910	$\alpha=0.3$	P ₃₃
34205560	34205560	12010376	11989917	$\alpha=0.4$	P ₃₄
34792021	34791861	12314515	12300245	$\alpha=0.5$	P ₃₅
35380503	35379728	12686465	12665852	$\alpha=0.6$	P ₃₆
35980514	35968316	12870692	12870692	$\alpha=0.7$	P ₃₇
36571106	36556903	13075966	13074774	$\alpha=0.8$	P ₃₈
37169774	37145714	13283730	13278899	$\alpha=0.9$	P ₃₉

جدول ۷- متوسط درصد اختلاف نتایج حاصل از نرم افزار ایمز با الگوریتم فراابتکاری.

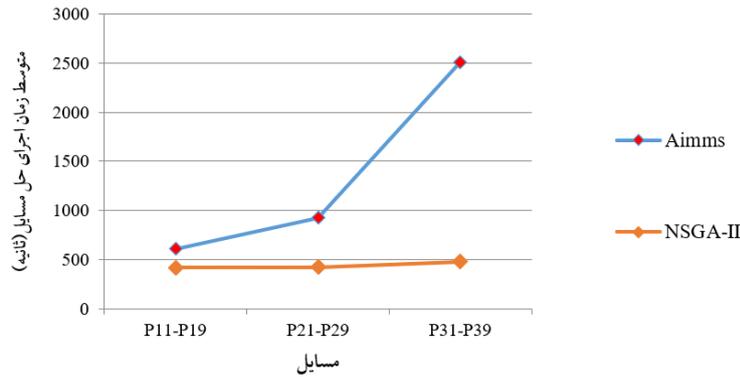
Table 7- Average percentage difference between the results obtained from the Aimms software and the meta-heuristic algorithm.

NSGA-II		
F ₂	F ₁	مسائل
0.0296	0.0226	P ₁₁ -P ₁₉
0.0233	0.0248	P ₂₁ -P ₂₉
0.0194	0.0612	P ₃₁ -P ₃₉

جدول ۸- متوسط زمان اجرای هر یک از مسائل توسط ایمز و الگوریتم فراابتکاری.

Table 8 - Average execution time of each problem by Aimms and metaheuristic algorithm.

NSGA-II	Aimms	مسائل
420	611	P ₁₁ -P ₁₉
423	924	P ₂₁ -P ₂₉
479	2510	P ₃₁ -P ₃₉



شکل ۱- متوسط زمان اجرای هر یک از مسایل توسط نرم‌افزار ایمز و الگوریتم فراابتکاری.

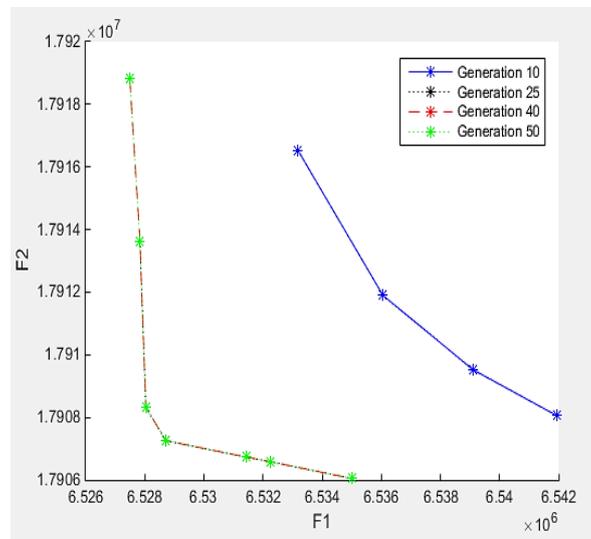
Figure 1- Average execution time of each problem by Aimms software and metaheuristic algorithm.

مطابق نتایج به دست آمده، مقادیر حاصل از حل دقیق در توابع، کمتر از مقادیر حاصل از الگوریتم فراابتکاری می‌باشد و نشان از بهینه‌سازی روش دقیق می‌دهد. همچنین با گسترش ابعاد مساله، مقادیر هزینه تابع هدف (۱) و تابع هدف (۲) افزایش می‌یابند و این حاکی از آن است که هزینه‌های بیشتری به زنجیره‌تامین حلقه بسته تحمیل می‌شود. با توجه به این که با افزایش درجه α ، فضای موجه کاهش می‌یابد، لذا مقادیر حاصل از هر دو تابع هدف برای روش پیشنهادی با افزایش α افزایش می‌یابد. متوسط درصد اختلاف جواب الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم دقیق، نشان از نزدیک بودن جواب‌ها است و این که اختلاف جواب‌ها کمتر از ۱٪ می‌باشد و این نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی، الگوریتم همگرا به جواب بهینه و کارا می‌باشد.

با توجه به جدول ۸ و شکل ۱ درمی‌یابیم که زمان حل نرم‌افزار دقیق برای P_{31-P39} به یک‌باره افزایش یافته است و با حل حاصل از الگوریتم فراابتکاری اختلاف چشم‌گیری پیدا کرده است که نشان می‌دهد الگوریتم فراابتکاری در ابعاد بزرگ مسایل، در زمان کمتری به جواب بهینه می‌رسد.

۴-۲- نمایش برخی شاخص‌های مقایسه‌ای الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی

سطحی از جبهه نامغلوب جواب نهایی برای مساله P_{19} (به ازای $\alpha=0.9$) برای نسل‌های ۱۰، ۲۵، ۴۰ و ۵۰ توسط الگوریتم $NSGA-II$ در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲- جبهه نامغلوب برای مساله P_{19} در الگوریتم $NSGA-II$.

Figure 2 - Undeclared front for problem P19 in the NSGA-II algorithm.

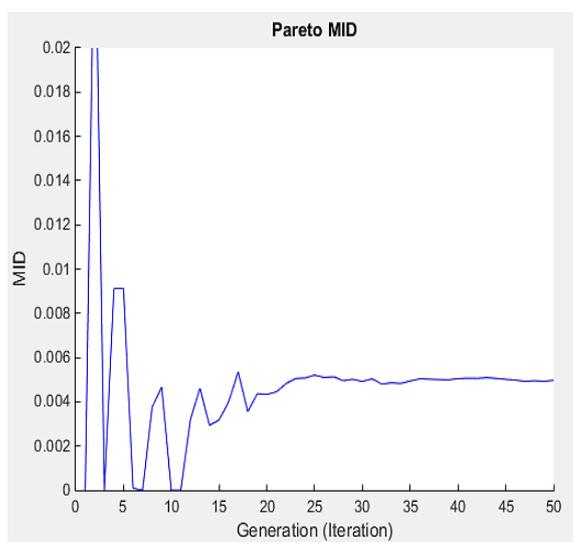
همچنین متوسط فاصله از نقطه ایده‌آل (MID) برای مساله P_{19} (به ازای $\alpha=0.9$) توسط الگوریتم فراابتکاری در شکل ۳ نمایش داده شده است.

برای محاسبه معیار MID از رابطه (۶۷) استفاده می‌شود.

$$MID = \frac{\sum C_i}{n} \quad (67)$$

در رابطه (۶۷)، n تعداد جواب‌های پارتو موجود در مجموعه پارتو می‌باشد. مقدار C_i نیز از رابطه (۶۸) محاسبه می‌گردد که در واقع فاصله توابع هدف هر جواب تا مبدا مختصات می‌باشد.

$$C_i = \sqrt{f_1^2 + f_2^2} \quad (67)$$



شکل ۳- نمودار MID برای مساله P19 در الگوریتم NSGA-II.

Figure 3 - MID diagram for problem P19 in the NSGA-II algorithm.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این تحقیق یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط فازی برای زنجیره‌تامین قطعات یدکی یک سازمان دفاعی ارائه گردید که دارای دو هدف کمینه‌سازی هزینه و افزایش سطح پاسخ‌گویی بود. با توجه به محدودیت‌های زیاد مدل و چندهدفه بودن آن، استفاده از روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی جهت دستیابی به جواب‌های بهینه سراسری یا موضعی، امری غیرممکن بود. از طرفی این مساله از پیچیدگی زمان محاسباتی برخوردار بوده و به عبارتی در گروه مسایل *NP-Hard* دسته‌بندی می‌شود. بنابراین، در این تحقیق، از الگوریتم فراابتکاری چندهدفه *NSGA-II* استفاده شده است. نتایج الگوریتم *NSGA-II* با نتایج حل روش دقیق ایتمز مقایسه شده است که نتایج نشان می‌دهد متوسط درصد اختلاف جواب الگوریتم پیشنهادی با روش دقیق، کمتر از ۱٪ می‌باشد. در ضمن زمان رسیدن به جواب در الگوریتم پیشنهادی نسبت به روش دقیق، به مراتب پایین‌تر است. بنابراین، الگوریتم پیشنهادی، همگرا به جواب بهینه و کارا می‌باشد. از طرف دیگر کارایی الگوریتم *NSGA-II* بر اساس شاخص‌های مقایسه‌ای، به دست آمده است. در الگوریتم *NSGA-II* برای انتخاب جواب‌ها در مجموعه جبهه نامغلوب از دو مقوله رتبه‌بندی و فاصله ازدحامی استفاده شده است و جواب‌هایی که رتبه کمتر و فاصله ازدحامی بالاتری دارند، در مجموعه جبهه نامغلوب انتخاب می‌شوند. همچنین در الگوریتم *NSGA-II* پیشنهادی از عملگر تقاطع و جهش چندنقطه‌ای استفاده شده است که هرکدام با احتمال معین، برای ایجاد جمعیت جدید انتخاب می‌شوند. در پایان توصیه می‌شود از مدل پیشنهادی تحقیق حاضر، برای زنجیره‌تامین قطعات سازمان‌های مشابه استفاده شود. همچنین، انجام تحقیق مشابه برای تامین سایر اقلام (به‌غیر از قطعات یدکی)، به‌عنوان تحقیق آتی پیشنهاد می‌شود.

منابع

- [1] Ameri, E., Ebadi, S. T., & Teymouri, E. (2021). Presenting an inventory management model for critical spare parts considering supplier disruption conditions under uncertainty. *18th international conference on industrial engineering*. (In Persian). Tehran, Iran, Civilica. <https://civilica.com/doc/1354248/>
- [2] Hosseinzadeh, M., & Ramezani, S. (2023). Provide integrated MRO-iREAM spare parts supply chain management framework. *Scientific journal of supply chain management*, 25(78), 71-88. (In Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20089198.1402.25.78.6.8>

- [3] Saeedi Souq, Y., Ahmadi, A., & Ramezani, S. (2020). Joint optimization of spare parts and condition based maintenance using monte carlo approach. *Supply chain management*, 17(49), 36-53. **(In Persian)**. https://scmj.ihu.ac.ir/article_203571.html?lang=en
- [4] Teymouri, E., & Ahmadi, M. (2019). *Supply chain management*. Iran University of Science and Technology Publications. **(In Persian)**. <https://b2n.ir/qu9753>
- [5] Rahmati, H., & Ramezani, S. (2021). Inventory management system and spare parts warehouse assessment framework and roadmap (MRO-iREAM). *Supply chain management*, 23(70), 71-90. **(In Persian)**. https://scmj.ihu.ac.ir/article_206295.html?lang=en
- [6] Jayaraman, V., Guide Jr, V. D. R., & Srivastava, R. (1999). A closed-loop logistics model for remanufacturing. *Journal of the operational research society*, 50(5), 497-508. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600716>
- [7] Kumar, S., & Craig, S. (2007). Dell, Inc.'s closed loop supply chain for computer assembly plants. *Information knowledge systems management*, 6(3), 197-214. <https://doi.org/10.3233/IKS-2007-00100>
- [8] Cavalieri, S., Garetti, M., Macchi, M., & Pinto, R. (2008). A decision-making framework for managing maintenance spare parts. *Production planning & control*, 19(4), 379-396. <https://doi.org/10.1080/09537280802034471>
- [9] García-Benito, J. C., & Martín-Peña, M. L. (2021). A redistribution model with minimum backorders of spare parts: A proposal for the defence sector. *European journal of operational research*, 291(1), 178-193. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.09.014>
- [10] Cantini, A., Peron, M., De Carlo, F., & Sgarbossa, F. (2024). A decision support system for configuring spare parts supply chains considering different manufacturing technologies. *International journal of production research*, 62(8), 3023-3043. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2041757>
- [11] Bashiri, M., & Sherafti, M. (2013). Advanced Bi-objective closed loop supply chain network design considering correlated criteria in fuzzy environment. *Journal of industrial engineering research in production systems*, 1(1), 25-36. **(In Persian)**. https://ier.basu.ac.ir/article_494.html?lang=en
- [12] Dehnad, H., & Bagheri, M. (2015). A review of the factors affecting the implementation of reverse logistics in the Iranian automotive industry. *International conference on modern research in industrial management and engineering*. **(In Persian)**. Tehran, Iran. Civilica. <https://civilica.com/doc/435358/>
- [13] Zareian Jahromi, H., Fallahnejad, M. S., Sadeghieh, A., & Ahmadi Yazdi, A. (2014). Robust multi-objective optimization model in sustainable closed-loop supply chain design. *Journal of industrial engineering research in production systems*, 2(3), 93-111. **(In Persian)**. https://journals.basu.ac.ir/article_816.html
- [14] Saffar, M. M., Shakuri Ganjavi, H., & Razmi, J. (2015). A green closed loop supply chain network design considering operational risks under uncertainty and solving the model with NSGA II algorithm. *Industrial engineering journal*, 49(1), 55-68. **(In Persian)**. <https://www.sid.ir/paper/166498/en>
- [15] Demirel, N., Özceylan, E., Paksoy, T., & Gökçen, H. (2014). A genetic algorithm approach for optimising a closed-loop supply chain network with crisp and fuzzy objectives. *International journal of production research*, 52(12), 3637-3664. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.879616>
- [16] Govindan, K., Soleimani, H., & Kannan, D. (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European journal of operational research*, 240(3), 603-626. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.012>
- [17] Ye, F., Zhao, X., Prahinski, C., & Li, Y. (2013). The impact of institutional pressures, top managers' posture and reverse logistics on performance—Evidence from China. *International journal of production economics*, 143(1), 132-143. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.12.021>
- [18] Omidi-Rekavandi, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Ghodrattnama, A. (2021). Mathematical modeling for the forward and reverse logistics network design. *Management research in Iran*, 17(4), 43-63. **(In Persian)**. https://mri.modares.ac.ir/article_3.html?lang=en
- [19] Pishvae, M. S., & Torabi, S. A. (2010). A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Fuzzy sets and systems*, 161(20), 2668-2683. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2010.04.010>
- [20] Jiménez, M., Arenas, M., Bilbao, A., & Rodríguez, M. V. (2007). Linear programming with fuzzy parameters: An interactive method resolution. *European journal of operational research*, 177(3), 1599-1609. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.10.002>
- [21] Keramaty, A., Esmaelian, M., & Rabieh, M. (2015). A new model for the multi-mode resource-constrained project scheduling problem with discount cash flows. *Industrial management studies*, 13(39), 63-90. **(In Persian)**. https://jims.atu.ac.ir/article_1979.html